

# ОСНОВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК У ГАЛУЗІ ЗВАРЮВАННЯ НАУКОВИХ ЦЕНТРІВ ТА ПРОВІДНИХ ВИРОБНИКІВ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

О.К. Маковецька, С.В. Пустовойт, В.С. Петрук, Н.С. Онищенко, Г.О. Полішко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150. м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Зварювання є однією з базових технологій індустріальної економіки, за допомогою якої створюється значна частка ВВП промислово розвинених країн. Для таких країн характерний сталий розвиток зварювального виробництва, що визначається зростанням споживання конструкційних матеріалів та зварювальної техніки, появою на ринку нових матеріалів, технологій, обладнання для зварювання. Світовий ринок зварювальної техніки, основними сегментами якого є зварювальне обладнання та матеріали для зварювання, має стійку динаміку зростання з річним темпом понад 7 % на рік, що, за оцінками експертів, становить майже 30 млрд дол. США, його основними драйверами є будівництво, автомобілебудування, енергетика, суднобудування, аерокосмічна промисловість. Стрімкий розвиток індустріальних технологій четвертої індустріальної революції спрямовано на повну автоматизацію виробництва, коли управління всіма процесами здійснюється в режимі реального часу з урахуванням зміни зовнішніх умов та взаємодії людини і техніки, та техніки між собою без втручання людини з використанням таких технологій, як штучний інтелект та Інтернет речей (IoT), 3D-друк, хмарні обчислення, мобільні пристрої, обробка великих масивів даних тощо. Бібліогр. 11, табл. 1.

*Ключові слова:* зварювання, зварювальне виробництво, зварювальна техніка, технології, ринок, стан, перспективи

**Вступ.** Зварювання належить до наукоємних, високоінноваційних технологічних процесів сучасного промислового виробництва і є базовою технологією отримання нероз'єднаних з'єднань, яка не має альтернативних рішень для багатьох галузей промислового виробництва – машино- і суднобудування, енергетики, промислового та цивільного будівництва, газо- і нафтовидобувного виробництва та багатьох інших, які й формують попит на ринку зварювальної техніки. З використанням зварювальних технологій і споріднених процесів у промислово розвинених країнах створюється значна частка ВВП [1].

Стратегії розвитку національних зварювальних виробництв на середньострокову перспективу практично не мають різких відмінностей та орієнтовані на вирішення актуальних завдань: збільшення обсягів, розширення областей застосування зварювання і споріднених технологій, підвищення продуктивності зварювання при одночасному забезпеченні високої якості з'єднань, зростання рівня механізації та автоматизації зварювальних робіт, зниження енергоспоживання і витрат на зварювання та споріднені технології, розширення застосування у зварних конструкціях, спорудах нових прогресивних металевих, композитних та неметалічних матеріалів.

Метою даної роботи є виявлення тенденцій розвитку світового ринку зварювальної техніки та перспективних напрямів досліджень провідних наукових центрів у галузі зварювання для підви-

щення конкурентоспроможності науково-технічної продукції вітчизняних виробників зварювального обладнання та матеріалів.

**Результати досліджень.** Глобальний ринок зварювальної техніки протягом багатьох десятиліть має стійку динаміку зростання: понад 7 % на рік, і нині, за оцінками експертів, становить майже 30 млрд дол. США [2, 3] і в майбутньому зберігається тенденція до його зростання. Його основними драйверами є будівництво, автомобілебудування, енергетика, суднобудування, аерокосмічна промисловість.

Зараз ми живемо в епоху завершення третьої, цифрової революції, що розпочалася у другій половині минулого століття, коли стався розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизація і роботизація виробничих процесів, та початку нової, четвертої.

Прогресивні зміни, що відбуваються в галузі технологій зварювання, провідні світові розробники і виробники зварювальної техніки пов'язують із загальносвітовими тенденціями розвитку індустріальних технологій, а саме четвертою промисловою революцією – Industry 4.0. Її характерною рисою є повна автоматизація виробництва, коли управління всіма процесами здійснюється в режимі реального часу з урахуванням зміни зовнішніх умов і взаємодії людини і техніки та техніки між собою без втручання людини. Усвідомлення цього позитивного впливу на соціально-економічний розвиток країн привело до того, що світові гіганти обробної промисловості, такі як Німеччина,

США, Франція, Японія, підтримали стратегічні урядові ініціативи щодо оцифрування своїх виробничих процесів у різних галузях промисловості [3]. Використання досягнень Industry 4.0 дозволить створити майбутнє гнучке виробництво, що підтримується такими технологіями, як штучний інтелект та Інтернет речей (IoT), тривимірний друк, хмарні обчислення, мобільні пристрої, великих масивів данні тощо.

За даними [4], обсяг світового ринку Industry 4.0 у 2021 р. який оцінювався у 114,55 млрд дол. США, у 2020 р. порівняно з 2019 р. продемонстрував середнє зростання на 13,9 %. Прогнозується, що ринок з 130,90 млрд дол. США у 2022 р. зросте до 377,30 млрд дол. США в 2029 р., при середньорічному темпі зростання в 16,3 % протягом прогнозованого періоду.

Широке застосування інформаційно-комунікаційних технологій Industry 4.0 при розробці технологій зварювання і зварювального устаткування – це стратегічна мета та завдання для науковців і розробників, їх реалізацією займаються провідні зварювальні наукові центри світу.

Британський інститут зварювання (TWI) є одним з провідних світових зварювальних центрів [5], що має статус науково-дослідної асоціації, який проводить дослідження і розробки в галузі зварювання і споріднених технологій та надає такі послуги, як консультації, експертизи, сертифікації, навчання, проведення неруйнівного контролю, інспекції в цілому. Інститут має розвинену міжнародну мережу закладів навчання й експертизи, що сприяє передачі технічних і практичних ноу-хау до регіонів.

Одночасно TWI є також потужною бізнесовою установою, загальний фінансовий прибуток якої у 2020 р. перевищив 64,7 млн GBP (для порівняння у 2010 р. – 53 млн GBP), включаючи доходи від ренти та урядових грантів – 10, 6 млн GBP. Доходи TWI складаються від різних видів діяльності, а саме: членства, ренти, продажу ліцензій, навчання, атестації та сертифікації (11,5 млн GBP), групових та поодиноких проектів для клієнтів, досліджень, Тематичні напрями Програми основних досліджень (CRP) TWI у 2021 р. та їхня промислова орієнтація

розробки та практичного використання методів ТДНК.

Основним джерелом фінансування науково-виробничої діяльності TWI є річні надходження від підприємств та фізичних осіб Великобританії та інших країн світу. Фінансування науково-виробничої діяльності TWI становить понад 77 % всього доходу, включаючи 18 млн GBP членських внесків, 35 млн GBP від контрактів.

Основу фундаментальних і прикладних наукових досліджень у галузі зварювання і споріднених технологій становлять роботи за тематичним планом – Програмою основних науково-дослідних робіт (CRP). Ця програма у 2021 р. складалася із 132 тем НДР фундаментального та прикладного характеру, які можна згрупувати за основними тематичними напрямками (таблиця). Кожна тема чітко орієнтована на одну чи кілька конкретних секторів промислового виробництва, де передбачається реалізація отриманих результатів НДР чи який є замовником виконання цієї теми.

Мета програми досліджень (CRP), як її формулює TWI, це «пошук майбутніх нових важливих знань, технологій та основ професійної майстерності для їхнього трансферу в промисловість; розробка технічних норм, рекомендацій та надання науково-дослідних послуг промисловим членам TWI» [5].

Науково-технічна діяльність TWI спрямована на скорочення виробничих витрат у зварювальному виробництві, підтримку інновацій, покращення якості й безпеки зварювальних робіт, забезпечення підвищення надійності зварних конструкцій, а також отримання науково-експериментальних обґрунтувань до норм та стандартів, тобто на вирішення конкретних і актуальних завдань промисловості, при цьому передбачено високий рівень завершеності розробок, що значно скорочує час на трансфер технології.

Одним з перспективних напрямків підвищення продуктивності й якості зварювання у промисловості є впровадження автоматизованих і роботизованих систем, яке в цілому приводить до

Тематичні напрями	Промислові сектори виробництва
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Автоматизація та роботизація процесів зварювання</li> <li>• Адитивне виробництво</li> <li>• Цифрові технології та технології управління даними</li> <li>• Електронно-променеві технології</li> <li>• Дугові та плазмові процеси зварювання</li> <li>• Лазерні технології</li> <li>• Гібридні технології</li> <li>• Технології зварювання тертям</li> <li>• Обробка поверхні</li> <li>• Методи неруйнівного контролю</li> <li>• Міцність зварних конструкцій та методи її контролю</li> <li>• Метали, композити, їх зварюваність</li> <li>• Пластмаси, клеї, кераміка</li> <li>• Покриття</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Аерокосмічний</li> <li>• Транспорт (автомобіле-, суднобудування, залізничний транспорт)</li> <li>• Конструкції та проектування</li> <li>• Нафто-, газохімічна промисловість</li> <li>• Енергетика</li> <li>• Залізничний транспорт</li> <li>• Датчики контролю та медицина</li> <li>• Полімери та композити</li> <li>• Устаткування, зварювальні та зварні матеріали</li> <li>• Медицина</li> <li>• Електроніка</li> </ul>

соціально-економічного розвитку в країні. Так, за оцінками [6], використання роботів при зварюванні приведе до різкого зростання ринку Китаю при стабільному середньорічному темпі зростання в 12 %.

Світовий ринок робототехніки [7] у 2021 р. становив 55,8 млрд дол. США, а до 2026 р. зросте до 91,8 млрд дол. США при сукупному річному темпі зростання у 10,5 %. До 2025 р. у сегменті роботів для дугового зварювання очікується зростання на 624,13 млн дол. США, при цьому середньорічний темп зростання буде становити понад 4 % [8].

Світовий ринок роботизованого зварювання зріс з 2895,21 млн дол. США у 2011 р. до 5912,28 млн дол. США у 2021 р., при цьому сукупний середньорічний темп зростання становив 7,4 %. Очікується його подальше зростання до 15597,05 млн дол. США у 2031 р. при середньорічному темпі зростання 10,19 % [9]. Основними виробниками робототехнічного обладнання є ABB Group, FANUC Corp., Kawasaki Heavy Industries Ltd., KUKA AG, Mitsubishi Electric Corp., Rockwell Automation Inc., Robert Bosch GmbH, Siemens AG та Yaskawa Electric Corp.

Новітні покоління автоматизованих систем зварювальної робототехніки спрямовано на спільну роботу робота й людини, які вже починають витісняти покоління «ізолюваних» роботів. У 2008 р. Universal Robots продав перший у світі кобот, як їх назвали у світі задовго до того, як термін для цього нового класу роботів став широко використовуватися. Сьогодні це найбільш швидкозростаючий сегмент світового ринку робототехніки, який за прогнозом буде щорічно збільшуватися на 50 %.

Здійснювати постійний моніторинг і контроль параметрів зварювання у часі дозволило оснащення сучасних зварювальних роботів системами спостереження (машинного зору), яка зараз вже широко застосовується в робототехнічних системах для дугового і лазерного зварювання.

Слід зазначити, що вирішення нагальних проблем сучасного зварювального виробництва, а саме нестачі кваліфікованої робочої сили, підвищення вартості матеріалів для виробництва зварювальних матеріалів і зварювальної техніки, збільшення витрат на енергетичні й паливні ресурси, заробітну плату можливо тільки шляхом скорочення виробничих витрат та підвищення продуктивності праці у зварювальному виробництві.

З метою зниження матеріалоємності в зварних конструкціях все ширше застосовуються матеріали, зокрема, сталі й сплави з більш високими показниками міцності, а також легкі матеріали. Розробка і впровадження технологій з'єднання високоміцних сталей, алюмінієвих сплавів, різнорідних матеріалів, зокрема металу і композитів, термопластів – один з

напрямків дослідження і розробки сучасної зварювальної науки. До числа новітніх, високоефективних процесів належать технології зварювання тертям з перемішуванням, нові дугові й променеві технології зварювання, гібридні зварювальні процеси.

Технологія зварювання тертям з перемішуванням застосовується в різних галузях промисловості, але найбільш широко в аерокосмічній індустрії для з'єднання різних конструктивних елементів ракет і літаків з алюмінієвих сплавів. Наприклад, застосування технології зварювання тертям з перемішуванням для з'єднання циліндричних резервуарів ракети «Delta» дозволило підвищити міцність зварного шва на 30...50 %, що забезпечило економію витрат на 60 % при скороченні часу виробництва з 23 до 6 днів. Технологія забезпечує високу якість з'єднання – механічні й технологічні властивості зварних швів наближаються до відповідних властивостей основного матеріалу.

Безперечно основою зварювального виробництва залишатиметься зварювання плавленням. Розробки останніх років зробили суттєвий внесок у підвищення продуктивності й якості процесів дугового зварювання. Прикладом нових економічно ефективних високопродуктивних процесів дугового зварювання є технології зварювання кількома електродами – зварювання двома паралельними дротами, тандемне зварювання та їхні модифікації, як, наприклад система тандемного зварювання холодного перенесення металу – СМТ Twin (фірма «Фроніус») [10]. Дану зварювальну систему укомплектовано двома мікропроцесорними джерелами електроживлення, що працюють незалежно один від одного. Завдяки цьому можливе індивідуальне налаштування параметрів зварювальних процесів відповідно до специфічних умов виробництва. Крім того, система дозволяє обирати будь-який пристрій подачі дроту (з урахуванням очевидних обмежень фізичного характеру), що дає можливість змінювати швидкість подачі дроту в дуже широкому діапазоні. Система забезпечує застосування одночасно абсолютно різних технологій зварювання: два процеси холодного перенесення металу (СМТ) або комбінацію процесу імпульсно-дугового зварювання GMA (на провідному електроді) з процесом СМТ (на веденому електроді) в рамках однієї системи.

Технології зварювання кількома електродами забезпечують високу стабільність процесу, здатність до перекриття зазору, швидкість зварювання та якість шва. Після зварювання вироби потребують мінімальної обробки. Нові технології вже широко застосовуються в машино-, судно- і автомобілебудуванні.

Операції очищення після застосування дугового зварювання високоякісні й потребують бага-

то часу. Усуненню цих проблем сприяла розробка нових видів зварювальних порошкових дротів і дротів суцільного перерізу, зокрема самоочисних (Self-Cleaning Welding Wires) для напівавтоматичного і автоматичного (роботизованого) зварювання. Їхнє застосування забезпечує високу якість зварного шва завдяки стабільному горінню дуги і значному зменшенню бризок у процесі зварювання та силікатних точок на поверхні шва, які завдають певні труднощі при зварюванні багатшарових швів. Завдяки своєму прецизійному складу при зварюванні самоочисним дротом не потрібна попередня обробка поверхні металу – видалення іржі, покриттів фарби та інших забруднень. Дріт утворює гарний профіль валика і кращий зовнішній вигляд поверхні, що дозволяє зменшити необхідність у застосуванні операцій правлення і шліфування для зняття концентрацій напружень.

У секторі обладнання для дугового зварювання вже досить довгий час зберігається тенденція розробки і впровадження нових типів інверторних джерел живлення, які забезпечують підвищення продуктивності й якості процесу зварювання, зменшення маси та розмірів обладнання.

У сучасному виробництві якість виготовлення є ключовим фактором досягнення продуктивності. Наприклад, у суднобудуванні підганяння деталей і правка готових конструкцій займають до 30 % трудомісткості при виготовленні корпусу судна. Тому безперечно, що застосування зварювальних технологій, які базуються на використанні енергії високого рівня концентрації (лазерної, електронно-променевої), є шляхом до вирішення проблем підвищення продуктивності й якості продукції у багатьох галузях промислового виробництва. Лазерне випромінювання як технологічний інструмент застосовується для виконання багатьох технологічних процесів оброблення матеріалів – різання, зварювання, термообробки, поверхневого легування, прошиття отворів, очищення поверхні, наплавлення, маркування тощо. Застосування волоконної оптики для передачі променя значно розширило техніко-технологічні можливості лазерних систем.

Лазерні технології зварювання і обробки матеріалів забезпечують високу продуктивність і якість, економію енергії, матеріалів, розширюють можливості застосування в конструкціях важкооброблюваних матеріалів, при одночасному забезпеченні екологічної чистоти виробництва. Ці та інші чинники забезпечують технологічним лазерам і лазерним системам широку і ефективну сферу застосування і в зварювальному виробництві.

За останні десятиріччя арсенал високопродуктивних і наукоємних технологій зварювання по-

повнився гібридними технологіями плавлення. На основі лазерних технологій розроблено серію інноваційних гібридних процесів – лазерно-дугова, лазерно-плазмова, лазерно-індукційна, світло-лазерна, лазерно-дугова під флюсом.

Характерною особливістю гібридного зварювання плавленням є поєднання двох джерел нагрівання з відмінною щільністю енергії, що дозволяє використовувати зварювально-технологічні особливості кожного з них і одночасно нівелювати їхні недоліки. Завдяки цьому досягаються принципово нові технологічні можливості – підвищення продуктивності й якості з'єднання, зниження енерговитрат і загальних виробничих витрат.

Основними перевагами гібридних технологій порівняно з традиційними дуговими способами є більш висока швидкість процесу, висока якість зварного з'єднання, мінімальна зона термічного впливу, мінімальна витрата присадних матеріалів і практично повна відсутність термічних деформацій.

Ринок обладнання для контактного зварювання значно змінився за останні роки. В даний час доступні джерела живлення набагато точніші та ефективніші порівняно з джерелами живлення попередніх поколінь. Виробники також розробили програми-програматори зварювання, які виконують та зберігають програми зварювання. Ці пристрої автоматизують процес зварювання і, отже, зменшують брак деталей. Сегмент контактного зварювання досягне 2,8 млрд дол. США до 2026 р. [11].

Значного розвитку набули технології й устаткування для контактного зварювання рейок у стаціонарних і польових умовах, які користуються великим попитом на сучасному ринку зварювальної техніки. В основу конструкції цих машин покладено використання технології зварювання безперервним оплавленням із програмним регулюванням основних параметрів. Сучасні мобільні рейкозварювальні комплекси являють собою самохідні установки, які можуть пересуватися на рейковому ходу або на комбінованому, що дозволяє переміщатися як по рейках, так і по шосейних і ґрунтових шляхах.

Однією з пріоритетних галузей, на якій фокусується увага розробників зварювальних технологій, матеріалів і устаткування, є впровадження у виробничий процес інноваційних технологій, пов'язаних з безпекою здоров'я зварювальників і навколишнього середовища. Нині компанії-виробники демонструють активний підхід до запровадження систем безпеки виробництва і турботу про здоров'я і життя своїх працівників, що в свою чергу робить професію зварювальника більш привабливою.



## Висновки

1. Зварювання є базовою технологією у багатьох галузях промисловості та будівництві. Для промислово розвинених країн характерна досить стійка динаміка розвитку зварювального виробництва та зварювального ринку, яка визначається стабільним зростанням споживання конструкційних матеріалів, розширенням їхнього асортименту, а також появою на зварювальному ринку нових прогресивних матеріалів, технологій, обладнання для зварювання та пов'язаних з нею процесів.

2. В галузі технологій зварювання відбуваються прогресивні зміни, пов'язані із загальносвітовими тенденціями розвитку індустріальних технологій – Industry 4.0, характерною рисою якої є повна автоматизація виробництва, коли управління всіма процесами здійснюється в режимі реального часу з урахуванням зміни зовнішніх умов і взаємодії людини і техніки та техніки між собою без втручання людини, тобто відбувається оцифрування виробничих процесів у різних галузях промисловості. Використання досягнень Industry 4.0 дозволить створити майбутнє гнучке та доступне виробництво, що підтримується такими технологіями, як штучний інтелект та Інтернет речей (IoT), 3D-друк, хмарні обчислення, мобільні пристрої, великих масивів даних та ін.

3. Відбувається подальший розвиток зварювальних технологій, що базуються на використанні енергії високого рівня концентрації (лазерної, електронно-променевої) для вирішення проблем

підвищення продуктивності й якості продукції у багатьох галузях промислового виробництва.

4. На основі лазерних технологій набувають подальшого використання у промисловості високопродуктивні й наукоємні гібридні технології зварювання – лазерно-дугова, лазерно-плазмова, лазерно-індукційна, світло-лазерна та лазерно-дугова під флюсом.

## Список літератури/References

1. Мазур А.А., Пустовойт С.В., Маковецкая О.К. и др. (2014) Состояние и перспективы мирового и региональных рынков сварочных материалов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **11**, 737, 39–45.
2. Mazur, A.A., Pustovojt, S.V., Makovetskaya, O.K. et al. (2014) State-of-the-art and prospects of world and regional markets of welding materials (Review). *The Paton Welding J.*, **11**(737), 39–45.
3. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/welding-market-101657>
4. <https://finance.yahoo.com/news/welding-consumables-market-size-worth-220000186.html>
5. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-4-0-market-102375>
6. <https://theweldinginstitute.com/>
7. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/welding-consumables-market>
8. <https://www.bccresearch.com/market-research/engineering/robotics.html>
9. <https://www.marketresearch.com/Infiniti-Research-Limited-v2680/Global-Arc-Welding-Robots-14783023/>
10. <https://www.marketresearch.com/Inkwood-Research-v4104/Global-Robotic-Welding-Forecast-32233927/>
11. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tehnolohiyi/product-list?filter=2861>
12. <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-welding-machinery-market-to-reach-17-1-billion-by-2026--301526398.html>

## MAIN DIRECTIONS OF WELDING RESEARCH AND DEVELOPMENT PERFORMED BY RESEARCH CENTERS AND LEADING WELDING EQUIPMENT MANUFACTURERS

O.K. Makovetska, S.V. Pustovojt, V.S. Petruk, N.S. Onishchenko, H.O. Polishko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Welding is one of basic technologies of industrial economy, used to generate a considerable fraction of GNP in industrialized countries. Such countries are characterized by sustainable development of welding production that is determined by growth in consumption of structural materials and welding equipment, and emergence of new welding materials, technologies and equipment in the market. World market of welding equipment, the main segments of which are welding equipment and materials has a stable growth dynamics with an annual rate of more than 7%, which according to experts, is equal to almost 30 bln. USD. Its main drivers are construction, automotive industry, power engineering, shipbuilding and aerospace industry. Rapid development of industrial technologies of the fourth industrial revolution is aimed at full automation of production, when management of all the processes is carried out in real time, taking into account changes in external conditions and the interaction of people and equipment, and mutual interaction of equipment without human intervention, using technologies such as artificial intelligence and the Internet of things (IoT), 3D-printing, cloud computing, mobile devices, big data processing, etc. 11 Ref., 1 Tabl.

*Keywords:* welding, welding production, welding equipment, technologies, market, state, prospects

Надійшла до редакції 15.11.2022

## НОВА КНИГА



Недосека А.Я., Недосека С.А.

Основы расчета и диагностики сварных конструкций. Глава 7. Більш складні питання теорії – К.: Видавництво «ІНДПРОМ», 2021. – 94 с., 62 рис., 3 табл.

Сьома глава підводить підсумок досліджень авторів в області застосування АЕ технології при оцінці стану конструкцій. У ній сформульовано і зосереджено основні наукові гіпотези та досягнення авторів. Наведені матеріали є складнішими в освоєнні і при використанні в розрахунках і практиці контролю потребують підвищеної уваги. Останній параграф глави присвячено прикладу практичного використання розробленої методики при діагностуванні двох великогабаритних посудин, що показав цілком задовільні результати.

Книга призначена для студентів, аспірантів і викладачів машинобудівних спеціальностей вузів, для спеціалістів, які проходять перепідготовку на курсах підвищення кваліфікації за напрямом «Технічна діагностика», а також для інженерів підприємств і організацій, які працюють у галузі контролю та діагностики конструкцій.

ISBN 966-95315-1-4